

## Список использованных источников

1. Парфенюк А.С., Антонюк С.И., Топоров А.А. Диоксины: проблема техногенной безопасности технологий термической переработки углеродистых отходов // Экотехнологии и ресурсосбережение. 2002. № 6. С. 40–44.
2. Комплексная технология термической переработки отходов биомассы / Ю.В. Шишко, А.Ю. Усенко, С.М. Губинский, Р.Г. Хейфец, Е.В. Кремнева, Г.Л. Шевченко // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика: збірник наукових праць. Випуск 2. Дніпропетровськ: Нова ідеологія, 2010. 268 с. С. 217–227.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ПОДОВОГО ЭЛЕКТРОДА ДППТ С ВОДЯНЫМ И ВОЗДУШНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Ячиков М.И., Ячиков И.М.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»,  
г. Магнитогорск, Россия*

Одним из основных элементов дуговой печи постоянного тока (ДППТ) является подовый электрод, позволяющий подводить ток к шихте. На российских предприятиях, как правило, используются конструкции подового электрода, состоящие из стальной головки, контактирующей с жидким металлом, и медного водоохлаждаемого корпуса (рис. 1). Стальная часть обеспечивает способность электрода самовосстанавливаться, а медная – является зоной охлаждения и вынесена за пределы корпуса печи.

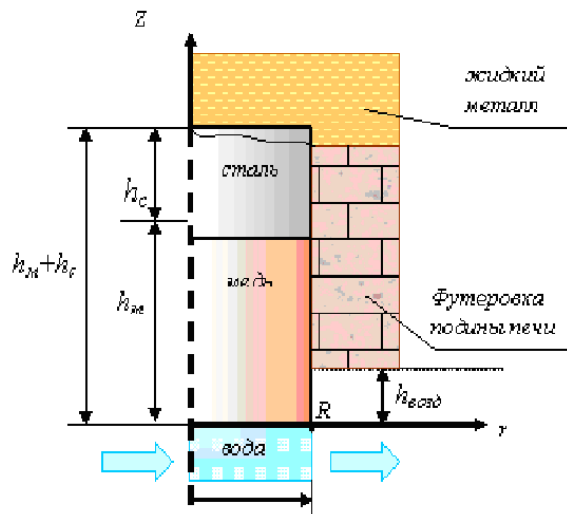


Рис. 1. Схематическое изображение подового электрода ДППТ с водяным охлаждением

При работе печи стальная часть электрода плавится, образуя в месте контакта с расплавом анодную яму. Одним из основных недостатков такого подового электрода является опасность контакта расплавленного металла с водой. Поэтому тепловое состояние подового электрода контролируется термопарами.

Одной из альтернативных мер по повышению безопасности работы подового электрода ДППТ может быть замена охлаждающей воды воздухом. Из литературы известно, что этот подход уже используется за рубежом. Трудности подобного перехода связаны с обеспечением приемлемых тепловых условий работы подового электрода из-за относительно низкого

коэффициента теплоотдачи и теплоемкости воздуха по сравнению с водой. Отсюда возникает необходимость разработки конструкции и выбор параметров воздушного охлаждения [1].

Целью работы является разработка математической модели и моделирование теплового состояния подового электрода дуговой печи постоянного тока с водяным и воздушным охлаждением при заданных технологических параметрах.

Рассмотрим составной подовый электрод с водяным (см. рис. 1) и воздушным (рис. 2) охлаждением в цилиндрической системе координат. Используя осевую симметрию, считаем, что температура  $T$  существенно меняется вдоль осей  $r$  и  $z$ , не меняется по углу  $\varphi$ , и зависит от времени ( $\partial T / \partial \varphi = 0$ ,  $\partial T / \partial \tau \neq 0$ ).

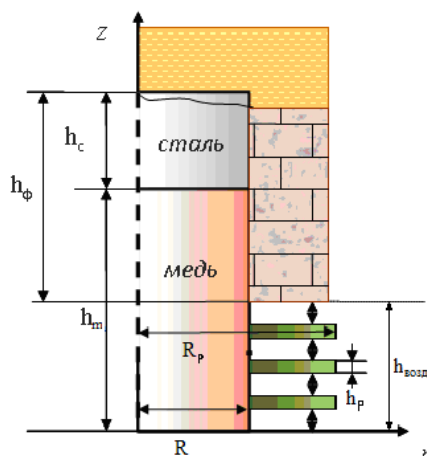


Рис. 2. Схематическое изображение подового электрода ДППТ с воздушным охлаждением

Температура в медной части электрода описывается уравнением Фурье (при  $\tau > 0$ ,  $z = 0 - h_m$ ,  $r = 0 - R$ )

$$\frac{\partial T_m}{\partial \tau} = a_m \cdot \left( \frac{\partial^2 T_m}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T_m}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где  $a_m = \frac{\lambda_m}{c_m \cdot \rho_m}$ ,  $\lambda_m$ ,  $c_m$ ,  $\rho_m$  – коэффициент температуропроводности, теплопроводности, теплоемкости и плотность для меди соответственно.

Будем считать, что распределение температуры в твердой, двухфазной и в жидкой области стали описывается уравнениями согласно теории квазиравновесной двухфазной зоны с линейными аппроксимациями для значений в двухфазной зоне.

Температурное поле  $T(r, z, \tau)$  в двухфазной области металла описывается уравнением теплопроводности с учетом выделения тепла кристаллизации ( $\tau > 0$ ,  $0 < r < R$ ,  $h_m < z < h_m + h_c$ )

$$c_{эф} \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (2)$$

Свойства металла описываются следующими кусочно-непрерывными функциями теплопроводности, плотности и эффективной теплоемкости:

$$C_{эф} = \begin{cases} C_m, & \text{при } T < T_{сол}; \\ C_m(\psi) + C_{жс}(1-\psi) + \frac{L}{T_{сол} - T_{лик}}, & \text{при } T_{сол} \leq T \leq T_{лик}; \\ C_{жс}, & \text{при } T > T_{лик}, \end{cases}$$

$$\lambda_{эф} = \begin{cases} \lambda_T, & \text{при } T < T_{сол}; \\ \lambda_m(\psi) + \varepsilon_k \lambda_{жс}(1-\psi), & \text{при } T_{сол} \leq T \leq T_{лик}; \\ \varepsilon_k \lambda_{жс}, & \text{при } T > T_{лик}, \end{cases}$$

$$\rho_{эф} = \begin{cases} \rho_m, & \text{при } T < T_{сол}; \\ \rho_m(\psi) + \rho_{жс}(1-\psi), & \text{при } T_{сол} \leq T \leq T_{лик}; \\ \rho_{жс}, & \text{при } T > T_{лик}. \end{cases}$$

где  $\psi(T)$  – доля твердой фазы,  $T_{лик}$ ,  $T_{сол}$  – температура ликвидуса и солидуса соответственно,  $\varepsilon_k$  – коэффициент, зависящий от интенсивности движения расплавленного металла.

Уравнение (2) пригодно для описания всего затвердевающего слитка в целом, без выделения границ твердой, двухфазной и жидкой зон. Количество твердой фазы в интервале затвердевания определяется по следующему закону

$$\psi(T) = \begin{cases} 1, & \text{при } T < T_{сол}, \\ \frac{T_{лик} - T}{T_{лик} - T_{сол}}, & \text{при } T_{сол} \leq T \leq T_{лик}, \\ 0, & \text{при } T > T_{лик}. \end{cases}$$

Для решения дифференциальных уравнений (1), (2) дополним их краевыми условиями.

Начальные условия.

В начальный момент времени считаем, что температура во всех точках одинаковая:

$$\text{при } \begin{matrix} z \text{ от } 0 \text{ до } h_m + h_c \\ r \text{ от } 0 \text{ до } R \end{matrix}, T(r, z, 0) = T_0. \quad (3)$$

Граничные условия.

На оси симметрии электрода:

$$\text{при } \begin{matrix} z \text{ от } 0 \text{ до } h_m + h_c \\ r = 0 \end{matrix}, \frac{\partial T}{\partial r} = 0. \quad (4)$$

На границе с расплавом:

$$\text{при } \begin{matrix} z = h_m + h_c \\ r \text{ от } 0 \text{ до } R \end{matrix}, T(r, z) = T_{сталь}, \quad (5)$$

где  $T_{сталь}$  – температура расплава в печи вблизи подового электрода.

На границе с футеровкой (пренебрегая тепловыми потерями):

$$\text{при } \begin{matrix} z \text{ от } h_{возд} \text{ до } h_m + h_c \\ r = R \end{matrix}, \frac{\partial T(r, z)}{\partial r} = 0. \quad (6)$$

На границе раздела медного и стального цилиндра:

$$\text{при } \begin{matrix} z = h_m \\ r = 0 - R \end{matrix}, \frac{\partial T_m}{\partial z} \lambda_m = \frac{\partial T_c}{\partial z} \lambda_c, T_m = T_c. \quad (7)$$

На торцевой поверхности цилиндра, охлаждающейся водой:

$$\text{при } \begin{matrix} z = 0 \\ r \text{ от } 0 \text{ до } R \end{matrix}, -\lambda_m \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_{жс}(T_m - T_{жс}), \quad (8)$$

где  $T_m$  – температура торца медной части электрода, соприкасающейся с водой,  $T_{жс}$  – температура охлаждающей воды,  $\alpha_{жс}$  – коэффициент теплоотдачи от медной стенки к воде.

На боковой поверхности цилиндра, охлаждающейся потоком воздуха:

$$\text{при } \begin{matrix} z \text{ от } 0 \text{ до } h_{\text{возд}} \\ r = R \end{matrix}, -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha_{\text{возд}}(T - T_{\text{возд}}), \quad (9)$$

где  $\alpha_{\text{возд}}$  – коэффициент теплоотдачи от стенок к воздуху,  $T_{\text{возд}}$  – температура воздуха, окружающего подовый электрод.

При вынужденном обтекании пластин радиатора воздухом

$$-\lambda_m \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_{\text{вын.возд}}(T_m - T_{жс}), \quad (10)$$

где  $\alpha_{\text{вын.возд}}$  – коэффициент теплоотдачи, который определяли по критериальному уравнению  $Nu = 0,3 Re^{0,6}$ .

На основе созданной математической модели (1–10) была разработана компьютерная программа «Расчет теплового состояния подового электрода ДППТ». Она позволяет при вводе данных иметь наглядное отображение размеров электрода, проверять корректность ввода основных технологических параметров и теплофизических свойств.

В результате расчета теплового состояния подового электрода можно получить распределение температуры в табличном и графическом виде (рис. 3).

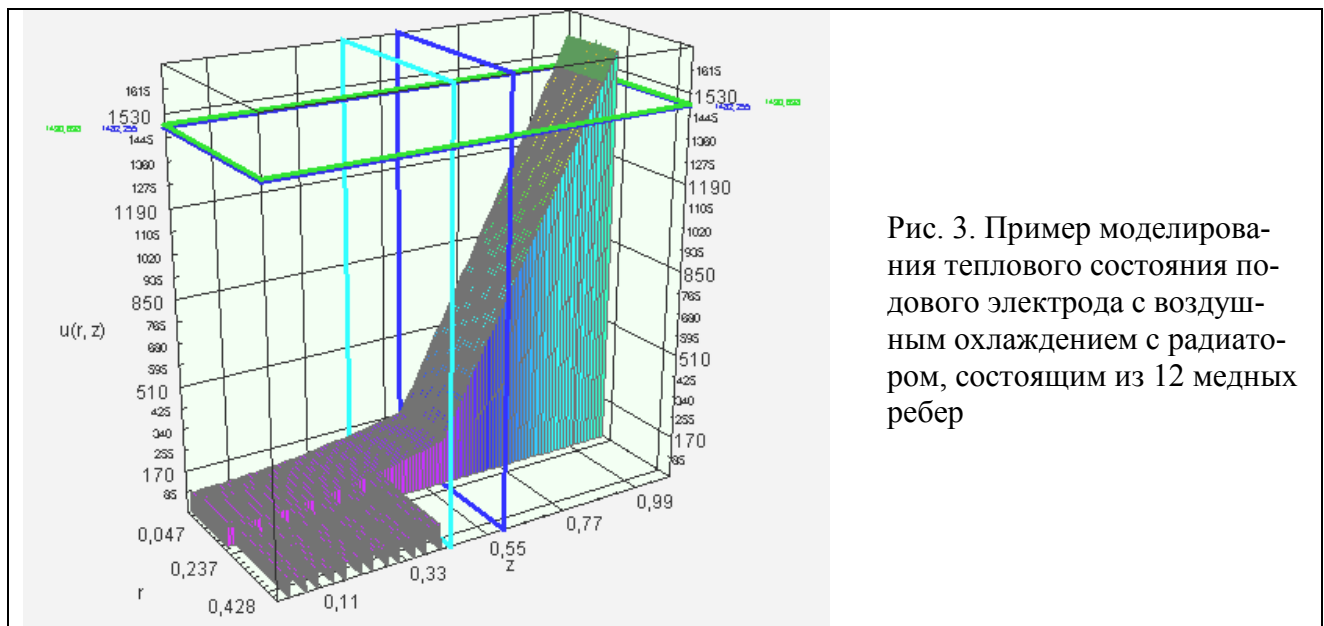


Рис. 3. Пример моделирования теплового состояния подового электрода с воздушным охлаждением с радиатором, состоящим из 12 медных ребер

В качестве объекта моделирования был выбран подовый электрод, имеющий следующие размеры:  $D = 2R = 200$  мм,  $h_c = 100$  мм,  $h_m = 350$  мм,  $h_{\text{возд}} = 150$  мм.

Моделирование проводилось для электрода с водяным охлаждением и для электрода с воздушным охлаждением, имеющего нижнюю часть из меди с 5 медными ребрами диаметром  $d_{\text{ребра}} = 0,8$  м. Расчет выполнен при следующих технологических параметрах: температура перегрева стали составила  $30^\circ\text{C}$  ( $T_{\text{сталь}} = 1350^\circ\text{C}$ );  $\alpha_{\text{возд}} = 50$  Вт/(м К),  $T_{\text{возд}} = 20^\circ\text{C}$ , вынужденная скорость воздуха вдоль пластин  $V_{\text{возд}} = 20$  м/с,  $\alpha_{жс} = 15000$  Вт/(м К);  $T_{жс} = 25^\circ\text{C}$ .

Для этих условий на рис. 4 приведены результаты моделирования, на которых отображается зависимость температуры поверхности составного цилиндрического электрода вдоль

его оси. Показано распределение температуры для моментов времени 5 и 20 минут от начала нагрева ( $T_0=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

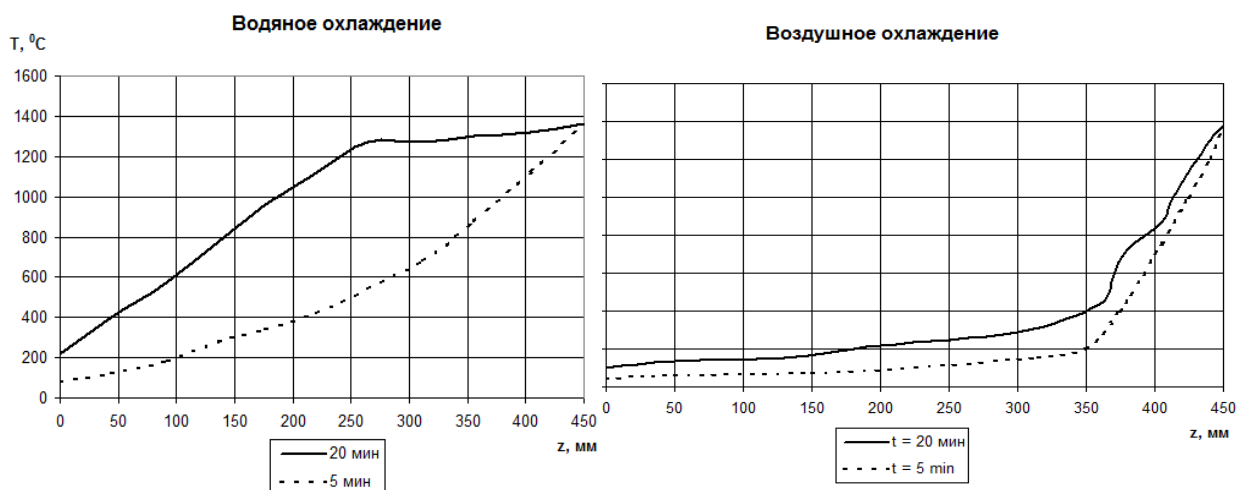


Рис. 4. Зависимость температуры поверхности по оси подового электрода для разных моментов времени и различных типов охлаждения

### Заключение

Таким образом, разработана математическая модель теплового состояния составных подовых электродов, имеющих водяное или воздушное охлаждение. Создан программный продукт, позволяющий проводить моделирование теплового состояния подового электрода при различных технологических параметрах. Проведенный анализ теплового состояния подового электрода ДППТ посредством математического моделирования показал возможность перехода на воздушную систему охлаждения.

### Список использованных источников

1. Ячиков И.М., Киреева М.В. Математическая модель теплового состояния составного подового электрода ДППТ // Теория и технология металлургического производства: межрегион. сб. науч. тр. / Под ред. В.М. Колокольцева. Вып. 11. Магнитогорск: изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та, 2011. С. 183–188.